

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2006～2010

課題番号：18100002

研究課題名（和文）昆虫の飛行制御の研究

研究課題名（英文） Study on Flight Dynamics of Insect

研究代表者

河内 啓二（KAWACHI KEIJI）

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：60143400

研究成果の概要（和文）：

昆虫は3億年に及ぶ自然淘汰の歴史に耐え抜いた信頼性と実績のある飛行制御システムを持っている。このシステムを細胞レベルからシステムレベル、さらに人工物による実証機レベルまで統一的に解明した結果、昆虫の持つ優れた制御メカニズムが細部に渡って定量的に明らかになった。すなわちはばたき運動をつかさどる神経ネットワークがどのように結合され、神経情報によって筋肉や羽がどのように動き、羽の周りの空気の動きや羽に働く空気力の変動が解明され、それらを統合した昆虫の動きの記述法が創出された。

研究成果の概要（英文）：

Insect has a reliable and excellent flight control system, which has been selected through the natural selection of three hundred million of years. In this research, this flight control system was investigated from a small cell size to a whole body size. In addition, we made fixed and rotary aircrafts with insect body sizes in order to examine new concepts obtained from this research of insect flight. The research results quantitatively indicated the excellences of the flight control system of the insect. We understood how to be connected neuron networks, how to move flight muscles, wings, and the air around wings, and how to fluctuate the aerodynamic force acting on wings. Finally, we obtained the transfer function of the height control system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	20,500,000	6,150,000	26,650,000
2007年度	17,800,000	5,340,000	23,140,000
2008年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2009年度	12,200,000	3,660,000	15,860,000
2010年度	11,400,000	3,420,000	14,820,000
総計	76,400,000	22,920,000	99,320,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・生体生命情報学

キーワード：システム生物学

1. 研究開始当初の背景

昆虫は3億年に及ぶ自然淘汰の歴史に耐え抜いた信頼性と実績のある飛行制御システムを持っている。その運動のほとんどは外部

から与えられた刺激に対する条件反射であると考えられ、それでいて極めて複雑巧妙な運動が可能である。これらの特色はそれ自体で極めて興味深いものであるが、近年注目を

浴びている微小飛行体の制御則としても適合性が高いと考えられる。

2. 研究の目的

飛行昆虫の制御応答システムを細胞レベルからシステムレベル、さらに人工物による実証機レベルまで統一的に解明する。得られた結果は制御則としてまとめ、実証機を用いた飛行試験等によりその特徴を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 細胞レベルでは飛行制御に関係する神経経路を調べる。(2) システムレベルでは、高速度ビデオにより運動を記録し、飛行制御則を伝達関数を用いて調べる。テザード飛行で視覚刺激に対する応答を、自由飛行で、風や胴体の運動を含んだ総合的な応答を調べる。(3) 実証機レベルでは昆虫のはばたき飛行の特色を調べるとともに、微小飛行体の制御則と設計指針を検討する。(4) 運動シミュレータでは、CFDを用いて非定常空気力を求め、飛行運動と連立させて解析する。

4. 研究成果

研究成果を研究対象のレベルごとに記述すると以下ようになる。

(1) システムレベルの研究の成果

①マルハナバチを用いてテザード状態における上下運動の視覚刺激(図1)をシステムへの入力とし、はばたき翼に発生する力を出力とする関係を調べ、伝達関数の形に整理した。
②ハチの発生する力を視覚刺激にフィードバックすることに成功し、ハチの制御系の伝達関数が航空機のパイロットに近く、常に一巡伝達関数を一定にするように制御していることを見いだした。人間の伝達関数はクロスオーバーモデルとして知られているが、マルハナバチのそれは2乗クロスオーバーモデルと呼べるものであった。
③ハチの自由飛行状態における伝達関数を同定し、テザード飛行との差を明らかにした。
④チョウの滑空飛行の安定性を定量的に解析し、その運動方程式と運動特性を明らかにした。

(2) 細胞レベルの研究の成果

①スズメガのはばたき運動を感知する機械感覚の神経経路を同定し、全ての神経経路が食道下神経節へ投射されていることを確認した。これは機械感覚情報が視覚情報と統合され、羽ばたき運動の調整を行うことを示唆し、システムレベルの研究とよく合致する結果である。
②昆虫のはばたき運動を制御するメカニズムを、筋肉の収縮とそれを引き起こす神経パルスの詳細な関係から明らかにした。

(3) 実証機レベルの研究の成果

①回転翼型の微小飛行体(図2)の制御系と空力特性を上記のシステムレベル研究を指針として改修し、2m/sの風まで位置制御ができることを実証した。
②実用化を考慮し固定翼型の微小飛行体を開発し、5m/sの風まで安定して飛行できることを実証した。
③はばたき型の微小飛行体(図3)を開発し、はばたき飛行の安定性と重心位置の関係を明らかにした。さらにMEMSの技術を用いて羽に昆虫サイズの翅脈を作ることに成功した。翅脈の配置を変えることにより受動的制御ではあるが羽の振り角を制御できることを実証した。
④微小圧力計を作り、はばたき翼にはりつけて、翼の圧力変動の分布測定に成功した。

(4) 運動シミュレーションによる研究の成果

①CFDを用いて空気力計算を行い、胴体の運動と連立して解析する運動シミュレータを構成し、サイズの異なる4種類の昆虫のはばたき飛行を統一的に解明した。
②大きさの異なる昆虫のはばたき飛行は多様性に富み、羽周りの空気流の構造も大きく異なることを世界で初めて示した。
③大きさの異なる昆虫の飛行安定性を統一的に解明した。
これらの結果は昆虫の飛行の多様性を示す成果であり、通常、1種類の研究に特化して調べる従来の研究に大きな影響を与えるだろう。
以上の新しい知見を総合して、回転翼・固定翼・はばたき翼の優劣を評価した。特に共にホバリングが可能な回転翼とはばたき翼を比較すると、パワーの効率性、人工物としての作り易さでは回転翼が、運動性、突風応答性でははばたき翼がそれぞれ優れていることが示され、今後の微小飛行体の設計指針が得られた。

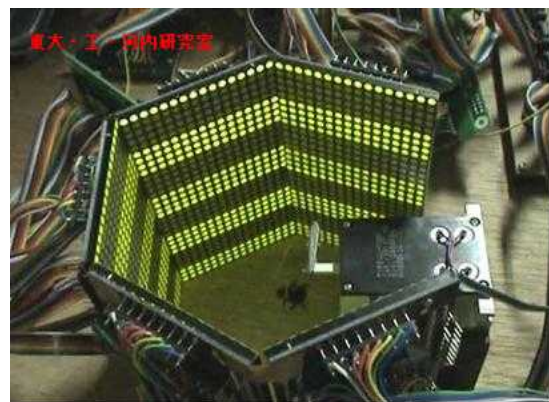


図1 視覚刺激装置



図2 回転翼型微小飛行体



図3 はばたき翼型微小飛行体

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 58 件)

- ① Sunada, S., Hatayama, Y. and Tokutake, H.: Pitch, roll, and yaw damping of a flapping wing, *AIAA Journal*, Vol. 48, No. 6, 2010, 1261-1265 査読有.
- ② Okamoto, M., Sunada, S., and Tokutake, H.: Stability analysis of gliding flight of a swallowtail as an example of a tailless airplane flying at a low Reynolds number, *AIAA Journal*, Vol. 48, No. 12, 2010, 2970-2976 査読有.
- ③ Nakata, T., and Liu, H.: A fluid-structure interaction model of insect flight with flexible wings, *Journal of Computational Physics* (印刷中). 査読有.
- ④ Takahashi, H., Aoyama, Y., Ohsawa, K., Tanaka, H., Iwase, E., Matsumoto, K., and Shimoyama, I.: Differential pressure measurement using a free-flying insect-like ornithopter

with an MEMS sensor. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5, 2010, 5/2/036005, 査読有.

- ⑤ Okamoto, M., Sunada, S. and Tokutake, H.: Stability analysis of a gliding flight of a swallowtail *Papilio xuthus*, *Journal of theoretical biology*, Vol. 257, pp.191-202, 2009 査読有.
- ⑥ H. Liu: Integrated modeling of insect flight: from morphology, kinematics to aerodynamics, *Journal of Computational Physics*, Vol. 228 (2), pp. 439-459, 2009 査読有.
- ⑦ Wang H., Ando N., and Kanzaki R.: Active controls of free flight maneuvers in a hawkmoth, *Agriu convolvuli*, *Journal of Experimental Biology*, Vol. 211, pp. 423-432, 2008, 査読有.
- ⑧ H. Aono, and H. Liu: Near- and far-field aerodynamics in insect hovering flight: an integrated computational study, *Journal of Experimental Biology* (Cover), Vol. 211, pp. 239-257, 2007, 査読有.
- ⑨ Hiroto Tanaka, Kiyoshi Matusumoto and Isao Shimoyama: Fabrication of a three-dimensional insect-wing model by micromolding of thermosetting resin with a thin elastic-mold, *J. of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 2485-2490, 2007, 査読有.
- ⑩ Tanaka, K. and Kawachi, K.: Response characteristics of visual altitude control system in *Bombus terrestris*, *J. of Experimental Biology*, Vol. 209, pp. 4533-4545, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 158 件)

- ① Ando, N., Sano, Y., Andoh, T., Takahashi, H. and Knazaki, R., Flight motor responses to looming visual stimuli in tethered flying bumblebees, *Bombus ignites*, 9th International Congress of Neuroethology, 2010, 8. 5-7, Salamanca, Spain.
- ② Tanaka, H. and Shimoyama, I.: Passive unsteady aerodynamic force of a swallowtail butterfly, Annual Main Meeting of the Society for Experimental Biology (SEB09), 2009, 6. 28-7. 1, Glasgow, UK.
- ③ Sunada, S.: Flight control of an

insect, The 3rd International conference 'Smart' materials, structures and systems, June 8-13, 2008, Sicily, Italy, (Invited)

- ④ H. Liu and H. Aono: Vortex dynamics, wake topology and high lift production in insect hovering: an integrated computational study, Proceedings of Biological Approaches for Engineering, 2008/3/17, Southampton, UK, (Invited).
- ⑤ 河内啓二: 昆虫の飛行制御, 日本航空宇宙学会飛行機シンポジウム, 2006. 10. 18, 大宮、(招待)。

[図書] (計 15 件)

- ① Sunada, S. and Tokutake, H., Developments of Centimeter-sized Aircraft, Encyclopedia of Aerospace Engineering, Vol. 7, Chapter 355, 2010, 10(分担執筆)

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 2重反転回転翼機
発明者: 砂田茂、得竹浩
権利者: 大阪府立大学
種類: 特許
番号: 2006-279062~4
出願年月日: 2006. 10. 12
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.kawachi.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

<http://www.brain.rcast.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河内 啓二 (KAWACHI KEIJI)
東京大学大学院・工学系研究科・教授
研究者番号: 60143400

(2) 研究分担者

砂田 茂 (SUNADA SHIGERU)
大阪府立大学・工学系研究科・准教授
研究者番号: 70343415

得竹 浩 (TOKUTAKE HIROSHI)
金沢大学・工学系研究科・准教授
研究者番号: 80295716

劉 浩 (RYU HIROSHI)
千葉大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 10342875

神崎 亮平 (KANZAKI RYOUHEI)
東京大学先端科学技術センター・教授
研究者番号: 40221907

下山 勲 (SHIMOYAMA ISAO)
東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授
研究者番号: 60154332